

Quelques outils pour la reconfiguration des robots parallèles entraînés par câbles (RPEC)

Philippe Cardou

Université Laval, Québec, Qc, Canada



Laboratoire de
robotique
de l'Université Laval



UNIVERSITÉ
LAVAL

Journée du groupe de travail 6 sur les mécanismes reconfigurables

Clermont-Ferrand, 3 octobre 2016

1 Introduction

2 Applications

- Un pantographe entraîné par câbles
- Impression 3D de grands objets
- Machines haptiques

3 Modèle mathématique d'un RPEC

4 L'espace de travail des RPEC

- La robustesse de l'équilibre
- Les interférences entre les câbles
- Arachnis

5 La synthèse des RPEC



But de la présentation

Présenter des outils pour la conception et la reconfiguration des robots parallèles entraînés par câbles.

- espace de travail
- synthèse automatique
- étalonnage



Un pantographe entraîné par câbles

**Pantographe plan
à 2 ddl entraîné
par câbles**

Dessin

Impression 3D de grands objets

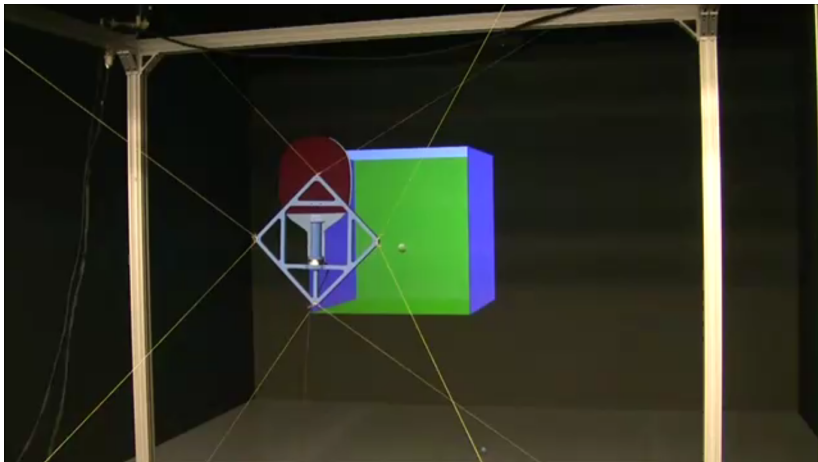
Large-Scale 3D Foam Printing With A Cable-Suspended Parallel Robot

Eric Barnett and Clement Gosselin
The Robotics Laboratory, Laval University, 2014

Machine haptique à trois degrés de liberté



Machine haptique à six degrés de liberté



Machine haptique avec grandes rotations

Virtual Reality
with Haptic Feedback

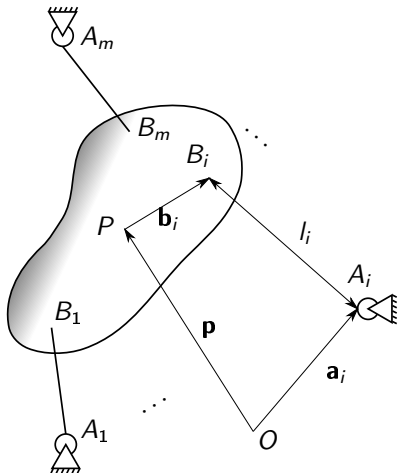
Modèle géométrique d'un RPEC

$$l_i^2 = \|\mathbf{a}_i - \mathbf{p} - \mathbf{b}_i\|_2^2$$

$$\delta \mathbf{l} = \mathbf{W}^T \delta \mathbf{s}$$

$$\delta \mathbf{l} = [\delta l_1 \quad \dots \quad \delta l_m]^T$$

$$\delta \mathbf{s} = \begin{bmatrix} \delta \phi \\ \delta \mathbf{p} \end{bmatrix}$$

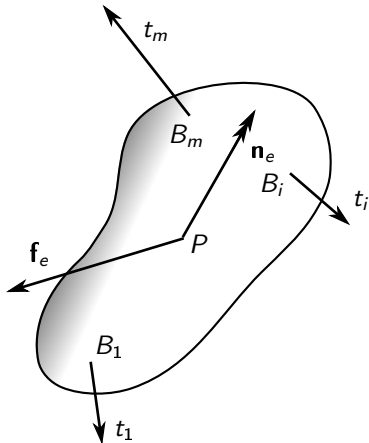


Bilan des forces à l'effecteur d'un RPEC

$$\mathbf{W}\mathbf{t} = \mathbf{w}_e$$

$$\mathbf{t} = [t_1 \quad \cdots \quad t_m]^T$$

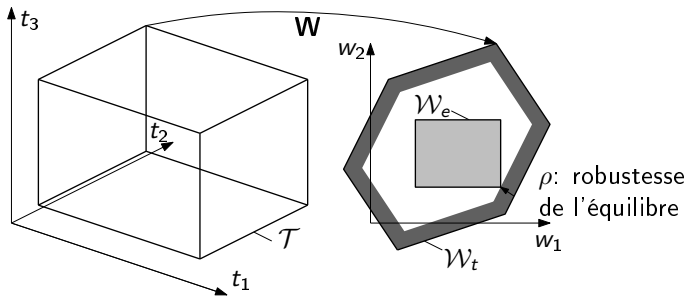
$$\mathbf{w}_e = \begin{bmatrix} \mathbf{n}_e \\ \mathbf{f}_e \end{bmatrix}$$



L'effet des limites de tension

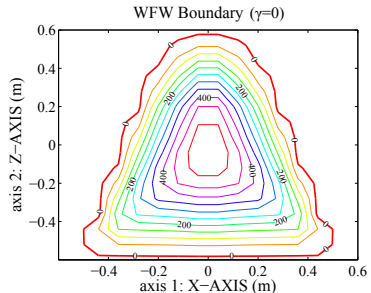
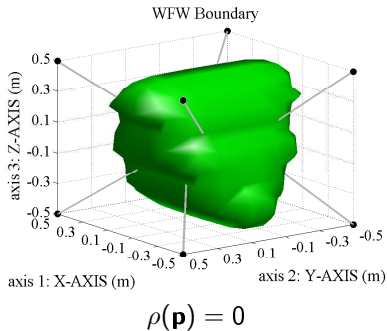
$$\mathcal{T} : \underline{t} \leq \mathbf{t} \leq \bar{\mathbf{t}}$$

$$\mathcal{W}_e : \mathbf{A}_e \mathbf{w}_e \leq \mathbf{b}_e$$



condition d'équilibre: $\mathcal{W}_e \subset \mathcal{W}_t$

L'espace des torseurs faisables d'un RPEC



Sommaire de la méthode proposée pour visualiser l'espace des torseurs faisables

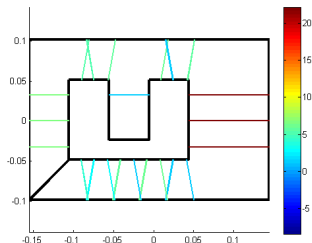
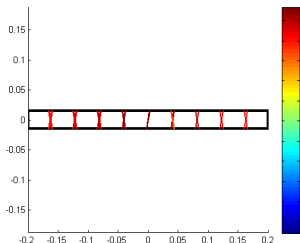
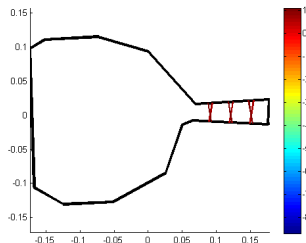
Quelques conclusions:

- méthode polyvalente
- le calcul de ρ est la seule difficulté
- l'interpolation pour visualisation se fait par des méthodes classiques
- l'indice ρ a une signification claire

Piste d'amélioration:

- raffinement de la mise en oeuvre du calcul de ρ
- application à d'autres domaines

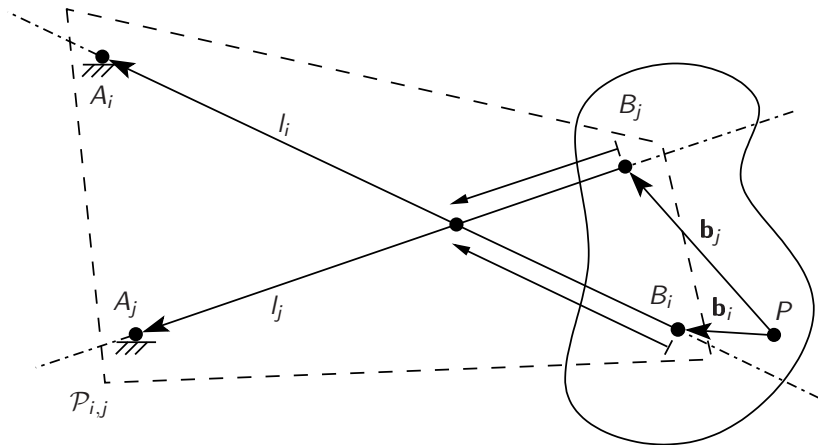
Aparté: la synthèse de prises robotiques



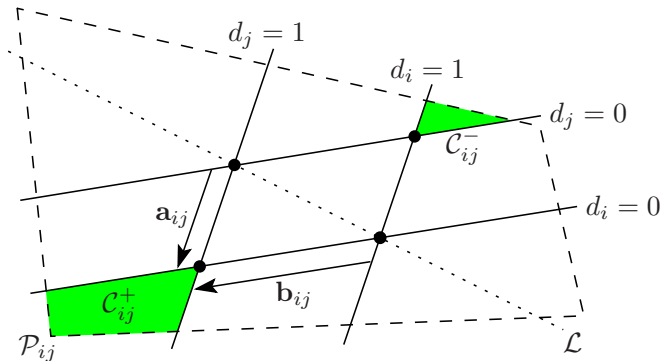
Aparté: la synthèse de prises robotiques



Interférence entre les câbles i et j



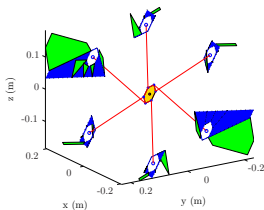
La région d'interférence entre les câbles i et j



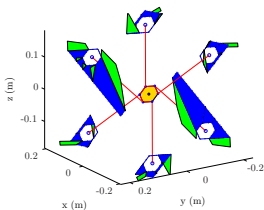
$$C_{ij}^+ = \{\mathbf{p} \in \mathbb{R}^3 | \mathbf{p} = \mathbf{a}_j - \mathbf{b}_i + \alpha(\mathbf{a}_j - \mathbf{a}_i) + \beta(\mathbf{b}_j - \mathbf{b}_i), \alpha, \beta \geq 0\},$$

$$C_{ij}^- = \{\mathbf{p} \in \mathbb{R}^3 | \mathbf{p} = \mathbf{a}_i - \mathbf{b}_j + \alpha(\mathbf{a}_j - \mathbf{a}_i) + \beta(\mathbf{b}_j - \mathbf{b}_i), \alpha, \beta \leq 0\}.$$

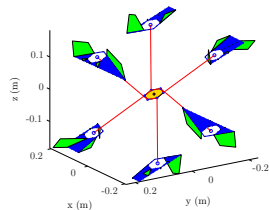
Application numérique: les régions d'interférence dans six orientations différentes



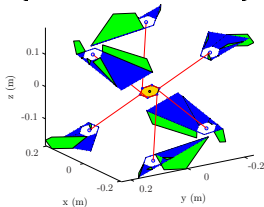
$$\{-45^\circ, -45^\circ, -45^\circ\}$$



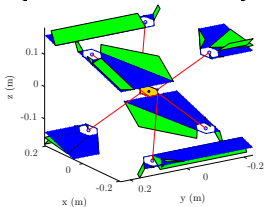
$$\{-45^\circ, -45^\circ, -15^\circ\}$$



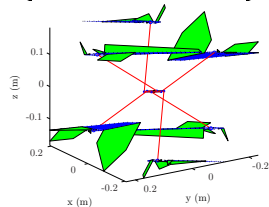
$$\{-45^\circ, -15^\circ, -15^\circ\}$$



$$\{-15^\circ, -15^\circ, -15^\circ\}$$



$$\{0^\circ, -15^\circ, 0^\circ\}$$



$$\{15^\circ, 15^\circ, 15^\circ\}$$

Arachnis: Analysis of Robots Actuated by Cables with Handy and Neat Interface Software



Robot and Cable Parameters

Checkboxes for choosing plot type

Section specific help data

Arachnis

UNIVERSITÉ LAVAL ARACHNIS

"Analysis of Robots Actuated through Cables by Handy and Neat Interface Software"

Robot Parameters

1. Select the number of cables: 4

2. Define the cable parameters

c#	c1	c2	c3	c4
ax (m)	-0.5	0.5	0.5	-0.5
ay (m)	-0.5	-0.5	0.5	0.5
az (m)				
rx (m)	-0.1	0.1	0.1	-0.1
ry (m)	0.1	0.1	-0.1	-0.1
rz (m)				
tmin (N)	1	1	1	1
tmax (N)	50	50	50	50

Robot Posture

3. Specify the platform pose (XYZ convention)

Posture

px	py	pz	phi	theta	psi
[Min,Max]	[-0.6,0.6]	[-0.6,0.6]			[-36,36]
reso	20	20			20

4. Specify a posture variable for each axis of the workspace plot

Axis 1: px Axis 2: py Axis 3: psi

Robot Task

5. Specify the required wrench set

Req. Wrench

Fx	Fy	Fz	Mx	My	Mz
[Min,Max]	[-10,10]	[-10,10]	0	0	0
					[-0.5,0.5]

Robot Visualization

☒ Nomenclature ☒ Wrench Feasible Workspace ☐ Interference-Free-Workspace ?

WFW Boundary

axis 2: Y-AXIS (m)

axis 1: X-AXIS (m)

Plot Data Cancel Progress Bar

Posture Parameters

Task Parameters

Plot Workspace

Save Simulation
Data

Cancel Simulation

Simulation
Progress



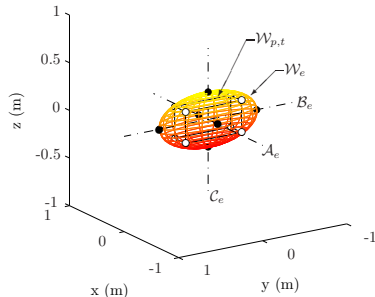
Définition du problème

- recherche des positions optimales des points d'attache
- espace de travail ellipsoïdal prescrit en translation
- orientations constantes $\mathbf{Q}_k$, $k = 1, \dots, q$
- contraintes d'équilibre de l'effecteur
- contraintes d'évitement d'interférences câbles-câbles
- contraintes d'évitement d'interférences câbles-arêtes
- contraintes sur les positions des points d'attache

Espace de travail ellipsoïdal

$$\mathcal{W}_e = \{\mathbf{p} \in \mathbb{R}^3 : (\mathbf{p} - \mathbf{p}_0)^T \mathbf{\Pi} (\mathbf{p} - \mathbf{p}_0) \leq \kappa^2\}$$

- maximiser κ pour maximiser l'espace de travail
- lorsque $\kappa = 1$, on atteint l'espace de travail visé



Problème d'optimisation avec objectif et contraintes algébriques

maximiser

$$\kappa,$$

sous contraintes

$$\mathbf{W}_{k,\epsilon}(\mathbf{p}_\epsilon)\mathbf{t}_{k,\epsilon} = \mathbf{0}_n,$$

$$\mathbf{p}_\epsilon = \mathbf{p}_0 + \kappa(\mathbf{p}_{\epsilon,0} - \mathbf{p}_0),$$

$$\mathbf{t}_{k,\epsilon} \geq \mathbf{0}_m,$$

$$\mathbf{1}_m^T \mathbf{t}_{k,\epsilon} = 1,$$

$$\boldsymbol{\mu}_{i,j,k}^T \text{adj}(\mathbf{H}_{i,j,k}) \boldsymbol{\mu}_{i,j,k} - 4h_{i,j,k} \det(\mathbf{H}_{i,j,k}) \leq 0,$$

$$-\boldsymbol{\mu}_{i,j,k} - 2\mathbf{h}_{i,j,k} \leq \mathbf{0}_2,$$

$$\boldsymbol{\eta}_{i,o,k}^T \mathbf{Z}_{i,o,k}^a \boldsymbol{\eta}_{i,o,k} - 4\det(\mathbf{N}_{i,o,k})(\mathbf{c}^T \boldsymbol{\eta}_{i,o,k} + n_{i,k}) \leq 0,$$

$$-\mathbf{D}^{-1}(\boldsymbol{\eta}_{i,o,k} - 2\mathbf{z}_{i,o,k}) \leq \mathbf{0}_3,$$

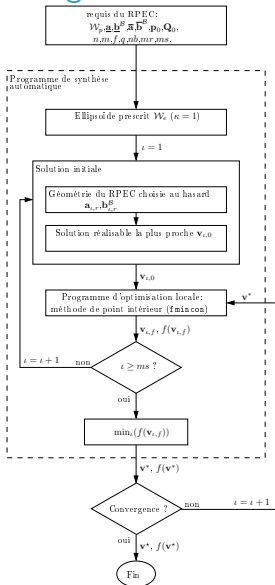
$$\underline{\mathbf{a}} \leq \mathbf{a}_i \leq \bar{\mathbf{a}},$$

$$\underline{\mathbf{b}} \leq \mathbf{b}_i \leq \bar{\mathbf{b}},$$

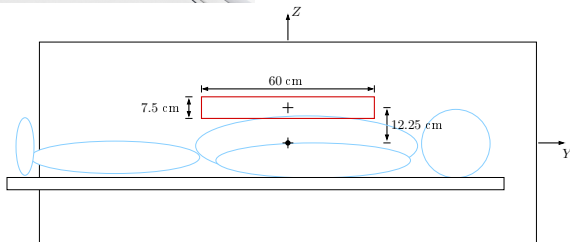
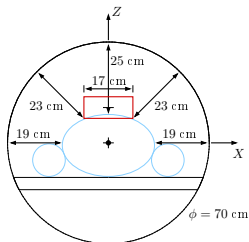
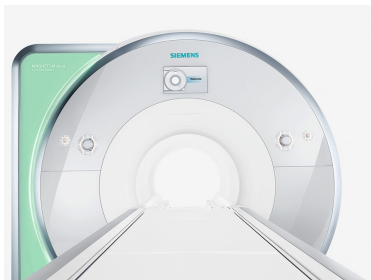
sur

$$\kappa, \mathbf{a}_i, \mathbf{b}_i, \mathbf{p}_\epsilon, \mathbf{t}_{k,\epsilon}, \boldsymbol{\mu}_{i,j,k} \text{ et } \boldsymbol{\eta}_{i,o,k}.$$

Ordinogramme de l'algorithme



Exemple: synthèse d'un RPEC pour un appareil d'IRM



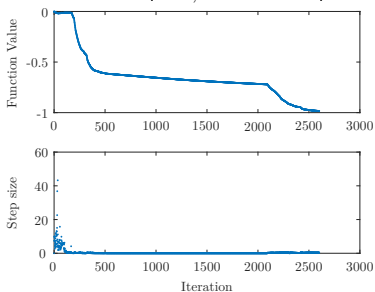


Sommaire des résultats d'optimisation

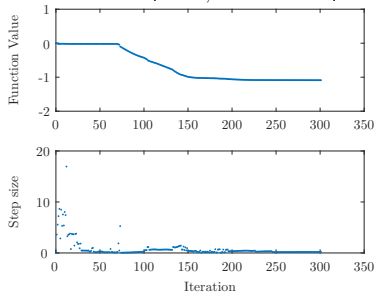
Essai ℓ	$\kappa_{\ell,f}$	Nb d'itérations	Temps (s)	Message d'arrêt
1	— — —	500	5 572.7	Solution rejetée
2	— — —	500	5 528.8	Solution rejetée
3	— — —	500	7 162.3	Solution rejetée
4	— — —	500	8 214.9	Solution rejetée
5	0.3982	1 274	13 747.1	Minimum local trouvé
6	0.6913	10 000	86 412.2	Nombre max. d'itér. atteint
7	0.8942	5 149	38 190.0	Minimum local trouvé
8	— — —	500	7 285.7	Solution rejetée
9	— — —	500	4 970.9	Solution rejetée
10	0.4933	1 523	12 112.8	Minimum local trouvé
11	— — —	500	6 808.3	Solution rejetée
12	— — —	500	6 660.3	Solution rejetée
13	— — —	500	4 459.3	Solution rejetée
14	— — —	500	4 453.7	Solution rejetée
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
64	0.9835	2 601	18 325.4	Minimum local trouvé
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
100 (*)	1.0880	301	2 675.8	Minimum local trouvé

Détail des essais $\iota = 64$ et $\iota = 100$

essai 64 ($\kappa_{64,f} = 0.9835$)

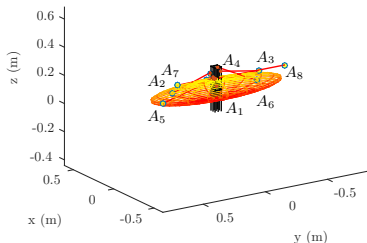


essai 100 ($\kappa_{100,f} = 1.0880$)

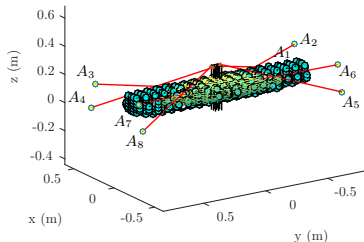
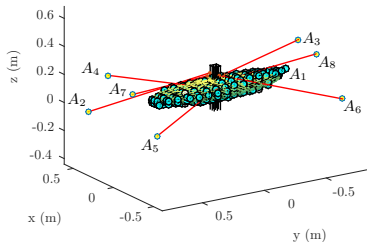
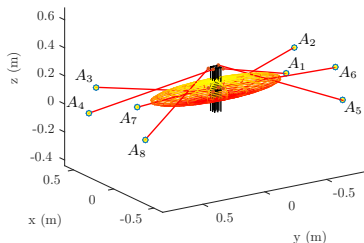


Comparaison des espaces de travail

essai 64 ($\kappa_{64,f} = 0.9835$)



essai 100 ($\kappa_{100,f} = 1.0880$)



Sommaire de la méthode de synthèse proposée

Quelques conclusions:

- la méthode prend en compte l'équilibre et les interférences
- la méthode permet de raffiner des essais initiaux
- la méthode semble plus performante avec l'intuition du concepteur
- les temps de calcul sont de l'ordre des heures et des jours

Quelques pistes d'amélioration:

- espace de travail polyédrique (et non ellipsoïdal)
- espace des torseurs faisables (limites de tension et de forces et moments extérieurs)
- algorithme d'optimisation globale plus sophistiqué
- intégration à Arachnis

Conclusion

À mon avis, on peut...

- ...prédire où peuvent aller les petits RPEC
- ...améliorer un concept initial de RPEC
- ...étalonner un RPEC avec une précision moyenne
- ...contrôler les déplacements et forces appliquées d'un RPEC

À mon avis, il reste des progrès à faire pour...

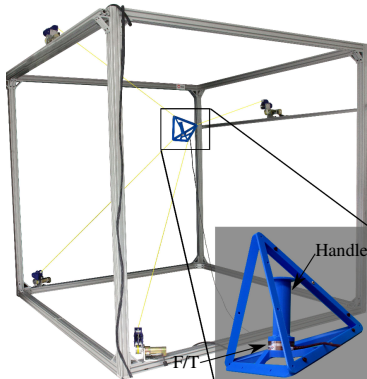
- ...prédire où peuvent aller les très grands RPEC
- ...générer un RPEC avec peu d'intervention humaine
- ...étalonner un RPEC avec une très bonne précision
- ...contrôler les déplacements et forces appliquées d'un très grand RPEC



Questions

?

L'étalonnage géométrique des RPEC



- On veut estimer plus précisément $\mathbf{a}_i$ et $l_{0,i}$, $i = 1, \dots, m$
- Si possible, on veut éviter d'ajouter des capteurs ou gabarits de référence
- La stratégie est d'utiliser la redondance de mesure des longueurs de câbles
- Ce travail est une application expérimentale du travail rapporté dans [1]

[1] J. A. Dit Sandretto, D. Daney, M. Gouttefarde, et C. Baradat, *Calibration of a fully-constrained parallel cable-driven robot*, INRIA, rapport technique RR-7879, 2012.

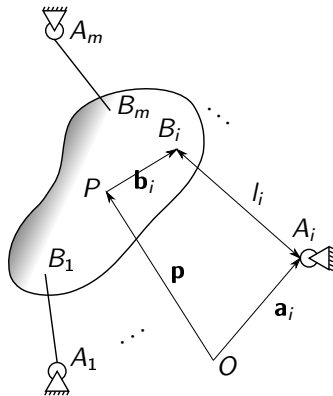
Modèle géométrique d'un RPEC

$$(\hat{l}_i - l_{0,i})^2 = (\mathbf{a}_i - \mathbf{p}_j - \mathbf{b}_i)^T (\mathbf{a}_i - \mathbf{p}_j - \mathbf{b}_i)$$

- supposons m câbles et n poses de l'effecteur

⇒ $m \cdot n$ équations

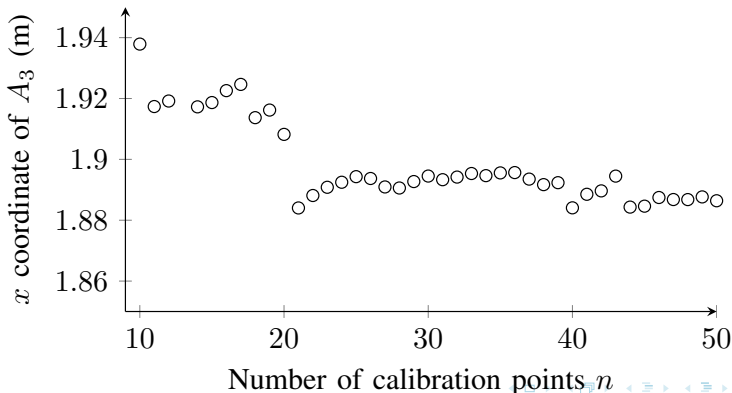
⇒ $4m + 3n - 6$ inconnues
($\mathbf{a}_i$, $l_{0,i}$, $\mathbf{p}_j$)



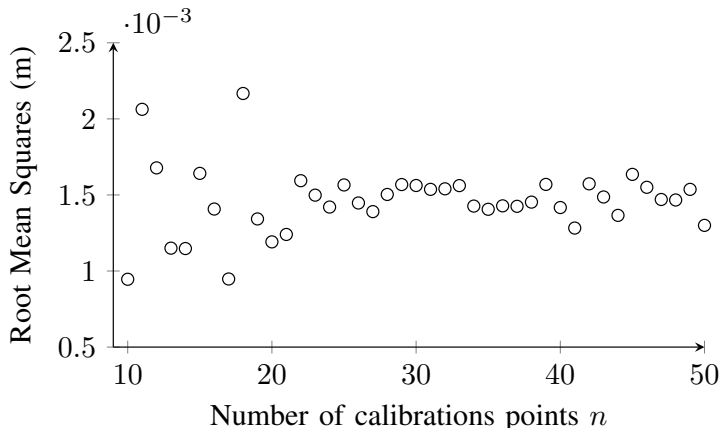
$$n \geq \frac{4m - 6}{m - 3} \text{ permet de résoudre le système d'équations}$$

Application d'une méthode de moindres carrés

$$\begin{aligned} &\text{minimiser } \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m \left((\hat{l}_i - l_{0,i})^2 - (\mathbf{a}_i - \mathbf{p}_j - \mathbf{b}_i)^T (\mathbf{a}_i - \mathbf{p}_j - \mathbf{b}_i) \right)^2 \\ &\text{sur } \mathbf{a}_i, l_{0,i}, i = 1, \dots, m, \mathbf{p}_j, j = 1, \dots, n \end{aligned}$$



Évolution de la valeur RMS des résiduels



Sommaire de la méthode d'étalonnage testée

Quelques conclusions:

- simple et facile à mettre en oeuvre
- ne requiert ni capteur supplémentaire ni gabarit de référence
- offre une précision qui semble limitée au centimètre

Quelques pistes d'amélioration:

- automatiser le choix de la trajectoire d'étalonnage suivie par l'effecteur
- utiliser un gabarit de référence
- utiliser des capteurs externes pour améliorer la précision (caméra 3D, appareil de poursuite laser)